延胡索酸二钠对早期断奶羔羊生长性能、瘤胃发酵功能及胃肠道发育的影响[1]

刘云芳　赖瀚卿　王　婷　王新峰*　潘晓亮*

（石河子大学动物科技学院，石河子 832000）

摘　要：本研究旨在探讨饲粮中添加延胡索酸二钠对早期断奶羔羊生长性能、瘤胃发酵功能及胃肠道发育的影响。试验选用 30 只为(50±5)日龄、体重为(25±2) kg 的公羔，随机分为 3 组，每组 10 只。对照组饲喂基础饲粮，试验组在对照组的基础上添加 0.5%和 1.0%的延胡索酸二钠。试验期 70 d。结果显示：1）饲粮添加延胡索酸二钠提高了平均日增重，其中 1.0%组显著高于对照组（P<0.05）。2）延胡索酸二钠未显著影响瘤胃液 pH（P>0.05），而显著降低了氨态氮浓度（P<0.05）；延胡索酸二钠显著极降低了瘤胃液乳酸浓度（P<0.01）；1.0%组瘤胃液总挥发性脂肪酸、乙酸和丙酸浓度显著高于对照组（P<0.05）。3）试验组小肠绒毛高度均高于对照组，其中 0.5%组羔羊的十二指肠、空肠、回肠的肠绒毛高度分别显著增加了 30.3%、30.6%、46.1%（P<0.05）；试验组的十二指肠绒毛高度/隐窝深度显著大于对照组（P<0.05），其中 0.5%组的绒毛高度/隐窝深度较对照组增加了 58.6%；0.5%和 1.0%组羔羊的瘤胃壁乳头高度分别比对照组提高 139.84 和 156.74 μm（P>0.05）；试验组瘤胃壁乳头密度与对照组比较无显著差异（P>0.05）。结果表明，添加延胡索酸二钠显著提高了羔羊的生产性能，促进了早期断奶羔羊瘤胃及肠道的发育。

关键词：延胡索酸二钠；断奶羔羊；生长性能；胃肠道

中图分类号：S826

有机酸如醋酸、苹果酸、柠檬酸及其钠盐等作为食品添加剂和调味剂应用已经十分普遍[1-3]，在单胃动物中也得到广泛应用[4-5]，但作为反刍动物的饲料添加剂还比较少见[6-7]。最新研究表明，延胡索酸等有机酸可改善反刍动物瘤胃发酵[8]，促进乳酸利用菌生长，降低乳酸产量，最终提高瘤胃液 pH，缓解营养性代谢病，如瘤胃酸中毒[8]。同时，在奶牛上的研究

收稿日期：2015-09-15

基金项目：国家自然科学基金项目（31360558）；兵团绵羊重点实验室开放课题（2013KLS04）；石河子大学高层次人材专项（RCZX201203，RCZX201102）

作者简介：刘云芳（1973-）女，新疆石河子人，副教授，博士，研究方向为动物生理学。E-mail： yunfangliu@shzu.edu.cn

*通信作者：王新峰，副教授，硕士生导师，E-mail： wxf-4@163.com；潘晓亮，教授，硕士生导师，E-mail： panxiaoliang600106@163.com

还表明，使用延胡索酸可促进纤维素分解菌生长，提高瘤胃内纤维素的消化率[9-10]。这些结果显示，延胡索酸及其钠盐可能有用做反刍动物饲料添加剂的潜力。然而，以前有关延胡索酸及其钠盐的研究主要集在成年反刍动物如泌乳奶牛及肉羊，延胡索酸二钠（disodium fumarate,DF）对早期断奶羔羊生产性能及消化系统发育有何影响，目前并不清楚。为阐明DF对早期断奶羔羊生长发育的作用效果，本研究通过在饲粮中添加DF，研究了其对早期断奶羔羊生长性能及不同肠段发育的影响，拟为DF作为饲料添加剂在羔羊饲粮中的应用提供科学的理论依据。

1 材料方法

1.1 试验材料与试验地点

DF（陕西交大瑞森渭南化学工业有限责任公司，2014）纯度≥98%。试验地点为新湖总场大西北畜牧有限公司种羊场。

1.2 试验设计

选取体况、体重及年龄相近的萨福克和与德美杂交1代羔羊30只，于（50±5）日龄左右断奶，将其随机分为3组，1个对照组和2个试验组，每组10只，试验期为70 d。饲粮为全混合日粮，每日于10:00和18:00饲喂2次，自由饮用清洁水。对照组饲喂基础饲粮，2个试验组在对照组饲粮的基础上分别添加0.5% 和1.0% DF（风干基础）。利用张丽英[11]介绍的凯氏定氮法测定饲粮的粗蛋白质含量，高锰酸钾法测定钙含量，磷钼蓝光度法测定总磷含量，索氏抽提法测定粗脂肪含量，范氏纤维测定法分析中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量。基础饲粮组成及营养水平见表1。

表1　基础饲粮组成及营养水平

Table 1　Composition and nutrient levels of basal diets　%

项目 Items	月龄 Months of age	
	1~2	3~4
原料（风干基础） Ingredients（air-dry basis）		
玉米粉 Corn power	35	25
苜蓿粉 Alfalfa power	45	
玉米青贮 Maize silage		70
精料补充料 Concentrate supplement	15	4
棉籽壳 Cottonseed hull	1	1

干草 Dried hay	4	
合计 Total	100	100
营养水平（干物质基础） Nutrient levels (DM basis)		
粗蛋白质 CP	15.01	11.03
钙 Ca	1.36	0.71
总磷 TP	0.33	0.29
中性洗涤纤维 NDF	22.10	29.30
酸性洗涤纤维 ADF	19.90	24.50
粗脂肪 EE	6.13	5.53

精料补充料（由华峰农牧科技有限责任公司生产）组成成分 Composition of the concentrate supplement (produced by *Huafeng* Husbandry Tech., Co., Ltd.) was as follows：膨化玉米 puffed corn，淀粉 starch,乳清粉 whey powder,奶粉 milk powder,糖 sugar,膨化大豆 puffed soybean,大豆粕 soybean meal,面粉 wheat powder,小麦麸 wheat bran,植物油 plant oil,玉米蛋白粉 corn gluten meal,代乳粉 milk replacer,氨基酸 amino acid,食盐 NaCl,复合微量元素 multi-microelements,复合维生素 multi-vitamins，石粉 limestone,磷酸氢钙 $CaHPO_4$。营养水平为 Nutrient levels were as follows：粗蛋白质 CP 17%~19%，钙 Ca 0.6%~1.2%，磷 P 0.4%~1.0%，食盐 NaCl 0.4%~1.0%，赖氨酸 Lys≥0.78%。

1.3 样品的采集和处理

1.3.1 样品采集

每日收集每组剩余饲粮量称重，并分别于试验第 1(初重)和 70 天（末重）早晨空腹称重，用于测定羔羊生长性能及计算料重比。第 70 天早晨饲喂前，每组随机选择 4 只，共计 12 只试验羔羊，颈静脉放血处死。迅速在十二指肠近端（5 cm 处）、空肠近端 1/4 处和空肠远端 1/4 处中间段、回肠中段分别取出约 2 cm 的肠管，使用 0.9%的生理盐水轻轻冲洗干净后，分别保存在 4%的多聚甲醛溶液中固定，用于测定不同肠段绒毛高度、隐窝深度、肌层厚度及黏膜层厚度[12]。采集瘤胃背囊顶部 1 块直径为 2 cm×3 cm 面积的瘤胃壁，置于 4%多聚甲醛溶液中，用于测定瘤胃壁上乳头的高度和密度。

屠宰羔羊的瘤胃液混匀后用4层纱布过滤，立即用便携式酸度计测定瘤胃液pH（PHB-4酸度计）。取3份2 mL过滤瘤胃液，1份加25%偏磷酸和巴豆酸（内标法，100 mL偏磷酸溶液中含巴豆酸0.646 4 g）混合液0.4 mL，-20 ℃冰箱保存，利用气相色谱仪（Agilent 7890B气相色谱仪）测定挥发性脂肪酸浓度[13]；另取1份样品与0.2 mol/L盐酸等体积混合,-20 ℃冰箱保存用于氨态氮浓度测定[13]；第3份瘤胃液-20 ℃冰箱保存，使用试剂盒测定乳酸浓度（乳酸测定试剂盒A019-2，南京建成生物工程研究所）。

1.3.2 胃肠道发育的测定

肠道组织用乙醇逐级脱水，二甲苯透明，石蜡包埋切片（6~8 μm 厚），苏木素-伊红（HE）染色，树胶封片，各段小肠取 5 张切片，每张切片选 5 个视野拍照，利用 Motic-Image-Advanced 3.2 图像分析软件计算每张照片 5 根最长的肠绒毛（以肠腺绒毛连接处到绒毛顶端为准）、最深的隐窝（以肠腺绒毛连接处到肠腺基部为准）和最厚的黏膜层（以肠腺绒毛连接处到黏膜下层为准）以及最厚的肌层（由内环与外纵 2 层平滑肌组成的，以黏膜下层到浆膜层上层的连线为准）[14]，测定方法见图 1。

将瘤胃组织样制成石蜡切片，采用 HE 染色。每只羔羊的瘤胃组织样切片的选择，均从背囊和尾腹盲囊区域的 1 块组织样切片中挑选 4 片制作完整清晰的切片，用 Motic-Image-advanced 3.2 图像分析软件测定其中 5 枚乳头状突起的高度，平均值为乳头高度。使用体视显微镜观察测定 1 cm^2 视野范围内瘤胃乳头状突起的数量，测定方法见图 2。

图 1　小肠结构示意图

Fig.1　Photograph of small intestinal structure

图 2　瘤胃壁乳头结构示意图

Fig.2　Photograph of ruminal wall papilla

1.4　数据处理分析

所得数据使用 Excel 进行整理，再使用 SPSS 13.0 软件进行 one-way-ANOVA 统计分析，结果以平均值±标准误表示，P<0.05 为差异显著，P<0.01 为差异极显著。结果差异显著，采用 Duncan 氏法进行多重比较。

2　结　果

2.1　生长性能

表 2 结果显示，0.5%和 1.0%组平均日增重分别比对照组提高 3.14 和 55.44 g，其中 1.0%组羔羊平均日增重显著高于对照组（P<0.05）。

表 2　延胡索酸二钠对羔羊生长性能的影响

Table 2　Effects of DF on growth performance of lambs

项目 Items	对照组 Control group	0.5%组 0.5% group	1.0%组 1.0% group

批注 [W1]: 图 2 文字改为瘤胃壁乳头高度

初重 Initial weight/kg	26.33±0.73	24.32±0.88	25.17±0.93
末重 Final weight/kg	31.85±0.97^{b}	33.30±1.38^{b}	35.60±1.43^{a}
平均日增重 Average daily gain/g	99.86±7.89^{b}	103.00±10.96^{b}	155.30±16.93^{a}
平均日采食量 Average daily intake/g	729.00	721.58	731.42
料重比 F/G	12.52	12.01	8.07

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著（P>0.05），不同小写字母表示差异显著（P<0.05），不同大写字母表示差异极显著（P<0.01）。下表同。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference (P>0.05), while with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05), and with different capital letter superscripts mean extremely significant difference (P<0.01). The same as below.

2.2 瘤胃发酵指标

表 3 结果显示，饲粮中添加 DF 并未显著影响羔羊瘤胃液 pH（P>0.05），而显著降低了氨态氮浓度（P<0.05）。添加 DF 极显著降低了瘤胃液乳酸浓度（P<0.01）。1.0%组总挥发性脂肪酸、乙酸和丙酸浓度显著高于对照组（P<0.05）。与对照组比较，试验组丁酸浓度和乙酸/丙酸未发生显著变化（P>0.05）。

表 3 延胡索酸二钠对断奶羔羊瘤胃发酵指标的影响

Table 3 Effects of DF on ruminal fermentation parameters of weaning lambs mmol/L

项目 Items	对照组 Control group	0.5%组 0.5% group	1.0%组 1.0% group
pH	6.72±0.06	6.80±0.07	6.76±0.45
氨态氮 Ammonia nitrogen/(mmol/L)	7.36±1.44^{a}	5.71±0.49^{b}	5.69±0.66^{b}
乳酸 Lactic acid/(mmol/L)	2.26±0.10^{Aa}	1.65±0.14^{Bb}	1.82±0.08^{Bb}
总挥发性脂肪酸 TVFA/(mmol/L)	60.77±11.99^{b}	60.09±5.51^{b}	73.30±9.40^{a}
乙酸 Acetate/(mmol/L)	43.82±9.47^{b}	43.98±4.32^{b}	54.11±8.76^{a}
丙酸 Propionate/(mmol/L)	9.71±2.10^{b}	9.66±0.74^{b}	11.52±1.02^{a}
丁酸 Butyrate/(mmol/L)	4.35±0.87	4.86±0.93	4.00±0.92
乙酸/丙酸 Acetate/propionate	4.56±0.51	4.57±0.36	4.64±0.57

2.3 消化道发育

表 4 结果显示，与对照组比较，0.5%和 1.0%组羔羊瘤胃壁乳头高度分别增加 139.51 和 156.74 μm，分别提高 8.2%和 9.2%，但差异不显著（P>0.05）；0.5%组羔羊瘤胃壁乳头密度与对照组接近，而 1.0%组羔羊瘤胃壁乳头密度较对照组下降，组间差异均不显著（P>0.05）。

0.5%和 1.0%组羔羊十二指肠绒毛高度显著高于对照组（P<0.05），其中 0.5%组羔羊肠绒毛高度较对照组增加了 30.3%；与对照组比较，1.0%组羔羊的十二指肠隐窝深度显著下降（P<0.05），隐窝深度减少了 18.5%，而 0.5%组无显著变化（P>0.05）；0.5%和 1.0%组的十

二指肠绒毛高度/隐窝深度（V/C）极显著高于对照组（P<0.01）；与对照组比较，0.5%组的肌层厚度增加了 9.2%（P<0.05），但 0.5%和 1.0%组十二指肠的黏膜层厚度与对照组比较并无显著性差异（P>0.05）。

0.5%和 1.0%组羔羊空肠绒毛高度显著高于对照组（P<0.05），其中 0.5%组空肠肠绒毛高度增加了 30.6%；与对照组比较，0.5%组的羔羊空肠隐窝深度显著下降（P<0.05），减少了 25.6%，而 1.0%组空肠隐窝深度与对照组比较差异不显著（P>0.05）；与对照组比较，0.5%组羔羊的 V/C 显著增加（P<0.05）；1.0%组的羔羊空肠肌层厚度显著高于对照组（P<0.05），增加了 56.9%；试验组空肠的黏膜层厚度与对照组比较无显著性差异（P>0.05）。

与对照组比较，0.5%组羔羊回肠绒毛高度显著提高（P<0.05），增加了 46.1%；0.5%和 1.0%组羔羊回肠隐窝深度与对照组比较无显著差异（P>0.05），但 0.5%组的回肠隐窝深度比对照组减少 17.9%；0.5%和 1.0%组羔羊回肠 V/C 与对照组比较差异不显著（P>0.05）；与对照组比较，0.5%组羔羊回肠肌层厚度显著增加了 10.4%（P<0.05），1.0%组羔羊回肠肌层厚度与对照组相比差异不显著（P>0.05）；0.5%和 1.0%组羔羊回肠的黏膜层厚度与对照组比较无显著性差异（P>0.05)。

表 4　延胡索酸二钠对羔羊瘤胃及小肠发育的影响

Table 4　Effects of DF on development of rumen and small intestine of lambs　μm

项目 Items		对照组 Control group	0.5%组 0.5% group	1.0%组 1.0% group
瘤胃壁乳头 Papilla of ruminal wall	乳头高度 Papilla height	1 709.33±87.05	1 848.84±173.84	1 866.07±133.04
	乳头密度 Papilla density/（根/cm^{2}）	172.78±29.0	176.46±14.6	144.71±11.9
十二指肠 Duodenum	绒毛高度 Villi height	393.57±51.20^{b}	512.80±17.99^{a}	492.53±46.51^{a}
	隐窝深度 Crypt depth	451.76±58.71^{a}	372.44±28.78^{ab}	368.14±29.62^{b}
	绒毛高度/隐窝深度 V/C	0.87±0.45^{Bb}	1.38±0.66^{Aa}	1.34±0.33^{Aa}
	黏膜层厚度 Mucosa layer thickness	663.10±9.02	637.99±18.04	668.69±21.65
	肌层厚度 Muscle layer thickness	129.41±3.04^{b}	141.26±4.70^{a}	138.44±1.97^{ab}
空肠 Jejunum	绒毛高度 Villi height	365.98±14.55^{b}	478.08±65.69^{a}	494.61±65.84^{a}
	隐窝深度 Crypt depth	395.25±40.10^{a}	293.95±24.18^{b}	374.28±36.36^{a}
	绒毛高度/隐窝深度 V/C	0.93±0.07^{a}	1.64±0.32^{b}	1.33±0.25^{a}
	黏膜层厚度 Mucosa layer thickness	751.94±32.81^{ab}	826.35±27.25^{b}	669.69±17.62^{a}
	肌层厚度 Muscle layer thickness	148.17±3.04^{a}	136.81±10.04^{a}	232.51±20.66^{b}
回肠 Ileum	绒毛高度 Villi height	327.02±6.82^{a}	477.92±83.44^{b}	380.60±32.19^{a}
	隐窝深度 Crypt depth	311.99±65.28	367.74±57.58	308.77±25.07
	绒毛高度/隐窝深度 V/C	1.07±0.19	1.30±0.12	1.24±0.04
	黏膜层厚度 Mucosa layer thickness	517.05±4.38^{ab}	488.00±15.02^{b}	550.29±17.20^{a}

肌层厚度 Muscle layer thickness	146.97±3.25^{b}	162.26±3.53^{a}	148.69±2.92^{b}

3 讨　论

本研究中DF提高了断奶羔羊的生长性能，其中1.0%组显著提高断奶羔羊的平均日增重。这是由于添加DF降低了瘤胃乳酸的浓度，与毛胜勇[15]研究结果相一致。同时DF在瘤胃中结合氢离子（H^+）被还原为延胡索酸，使瘤胃液保持正常的pH，有利于瘤胃微生物的饲料降解[8]。本研究中添加DF提高羔羊瘤胃液总挥发性脂肪酸、乙酸和丙酸浓度，此结果与毛胜勇[15]在山羊饲粮中添加DF能够提高挥发性脂肪酸浓度的结果相似，而挥发性脂肪酸是动物合成体组织及重要的能量来源物质[16]。同时被还原成的延胡索酸是三羧酸循环中的中间代谢产物，可转变为谷氨酰胺进而促进肠道发育，也有利于饲粮营养物质在瘤胃中的消化和吸收[17]，从而提高动物的生长性能。

小肠绒毛长度、隐窝深度、V/C等指标被认为是衡量小肠消化吸收功能的重要指标[18]。肠绒毛是由肠上皮和固有层共同向肠腔突出形成的细小突起，长约0.35～1.00 mm，可使肠腔表面积扩大约10倍，绒毛多呈柱状、叶状或指状等[19]。肠绒毛高度的增加能够使小肠吸收营养物质的面积增大，促进营养物质的吸收及动物的生长。本研究的结果显示，试验组的肠绒毛高度有显著性的增加，降低了十二指肠和空肠隐窝深度，促进了小肠对肠道中养分的吸收。这可能是饲粮中添加一定量的DF，被还原成延胡索酸，而延胡索酸是三羧酸循环的中间产物，可以代谢为α-酮戊二酸，而α-酮戊二酸是谷氨酰胺合成的前体物，最终使谷氨酰胺的合成增加，从而促进肠道上皮细胞的分化和发育，这与Souba[20]和Reeds等[21]报道的谷氨酰胺是快速生长和分化细胞如淋巴细胞、肠黏膜上皮细胞的重要能量底物的研究结果相一致。

Buddle等[22]认为绒毛高度/隐窝深度的高低反映了肠道绒毛上皮细胞吸收功能和隐窝上皮细胞分泌功能。本研究中试验组的V/C均有提高，这一结果与晏家友[23]使用复合酸化剂提高断奶仔猪V/C的结果相一致。同时有研究指出，小肠的黏膜和肌层与小肠的节律性收缩运动和食糜的机械消化效率密切相关[24]，同时它也是维持小肠正常消化与吸收功能的重要保障[25]。本研究结果表明，试验组的小肠黏膜厚度与肌层厚度较对照组均有提高，这充分说明了DF能够改善和维护羔羊小肠黏膜的正常结构，能提高羔羊小肠的消化吸收功能。

瘤胃发育是羔羊实现从非反刍动物向反刍动物转变的最重要生理变化，饲粮的物理形态、类型及动物日龄等诸多因素,对瘤胃发育有直接或间接作用[26-27]。Lesmeister 等[28]研究结果表

明，瘤胃乳头高度可以较好地反映幼龄反刍动物的瘤胃发育情况，而单位面积的乳头数量不应作为评定瘤胃发育的指标。本研究中，饲粮中添加 DF 提高了羔羊瘤胃壁上乳头高度。这一结果与已报道的结果相一致[29-30]，饲粮碳水化合物和蛋白质的微生物发酵产生的挥发性脂肪酸可刺激前胃的发育，可以为胃黏膜生长提供能量，促进胃肠上皮增殖分化。本研究中，由于 DF 可被肠道微生物还原成丙酸，同时也提高了其他挥发性脂肪酸的浓度，短链脂肪酸是结肠黏膜上皮细胞的主要供能物质，能显著促进结肠黏膜上皮细胞的增殖和分化。

4 结 论

①饲粮中添加 1.0% DF 显著提高了羔羊的平均日增重。

②饲粮中添加 1.0% DF 极显著降低了羔羊瘤胃液乳酸浓度，显著提高了羔羊瘤胃液总挥发性脂肪酸、丙酸及乙酸浓度。

③饲粮中添加 DF 提高了小肠绒毛高度，显著提高了十二指肠绒毛高度/隐窝深度。

④饲粮中添加 DF 有提高瘤胃壁上乳头高度的趋势。

参考文献：

[1] MAJZOOBI M,KAVEH Z,FARAHNAKY A.Effect of acetic acid on physical properties of pregelatinized wheat and corn starch gels[J].Food Chemistry,2016,196:720–725.

[2] AMER M A,NOVOA-DÍAZ D,PUIG-PUJOL A,et al.Ultrasonic velocity of water-ethanol-malic acid-lactic acid mixtures during the malolactic fermentation process[J].Journal of Food Engineering,2015,149:61–69.

[3] PORNSUKSOMBOON K,HOLLÓ B B,SZÉCSÉNYI K M,et al.Properties of baked foams from citric acid modified cassava starch and native cassava starch blends[J].Carbohydrate Polymers,2016,136:107–112.

[4] LIU S T,HOU W X,CHENG S Y,et al.Effects of dietary citric acid on performance,digestibility of calcium and phosphorus,milk composition and immunoglobulin in sows during late gestation and lactation[J].Animal Feed Science and Technology,2014,191:67–75.

[5] DEHGHANI-TAFTI N,JAHANIAN R.Effect of supplemental organic acids on performance,carcass characteristics,and serum biochemical metabolites in broilers fed diets containing different crude protein levels[J].Animal Feed Science and Technology,2016,211:109–116.

[6] FOLEY P A,KENNY D A,LOVETT D K,et al.Effect of *DL*-malic acid supplementation on feed intake,methane emissions,and performance of lactating dairy cows at pasture[J].Journal of Dairy Science,2009,92(7):3258–3264.

[7] CASTILLO C,BENEDITO J L,PEREIRA V,et al.Malic acid supplementation in

growing/finishing feedlot bull calves:Influence of chemical form on blood acid–base balance and productive performance[J].Animal Feed Science and Technology,2007,135(3/4):222–235.

[8] MAO S Y,ZHANG G,ZHU WY.Effect of disodium fumarate on ruminal metabolism and rumen bacterial communities as revealed by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of 16S ribosomal DNA[J].Animal Feed Science and Technology,2008,140(3/4):293–306.

[9] 尹文新,李香子,金哲勇,等.延胡索酸对延边黄牛瘤胃发酵及养分降解率的影响[J].畜牧与兽医,2010,42(12):34–37.

[10] 杨承剑.延胡索酸二钠对山羊瘤胃甲烷生成的调控研究及相关瘤胃微生物菌群分析[D].博士学位论文.南京:南京农业大学,2011.

[11] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].3 版.北京:中国农业大学出版社,2007.

[12] 张军民,高振川,王连娣,等.谷氨酰胺对饲喂生大豆的仔猪抗氧化能力和肝、肠组织中γ-谷氨酰转肽酶活性的影响[J].中国农业科学,2003,36(5):567–572.

[13] 王新峰.绞股蓝皂甙对山羊瘤胃菌群及微生物发酵特性和甲烷产量的影响[D].博士学位论文.南京:南京农业大学,2009.

[14] 蔻慧娟.酵母培养物对羔羊生产性能、营养物质消化率及瘤胃发育的影响[D].硕士学位论文.西安:西北农林科技大学,2011.

[15] 毛胜勇.延胡索酸及其钠盐对瘤胃发酵特性及瘤胃细菌菌群的影响[D].博士学位论文.南京:南京农业大学,2006.

[16] 邹思湘.动物生物化学[M].4 版.北京:中国农业出版社,2011.

[17] 代兵,邹思湘,陈够芬,等.谷氨酰胺对早期断奶仔猪生长性能及肠道形态发育的影响[J].畜牧与兽医,2011,43(11):7–11.

[18] SAMANYA M,YAMAUCHI K E.Histological alterations of intestinal villi in chickens fed dried *Bacillus subtilis* var.*natto*[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part A:Molecular & Integrative Physiology,2002,133(1):95–104.

[19] 王书平,刘俊华.谷氨酰胺体内代谢过程及其调控机制[J].畜牧与饲料科学,2009,30(4):28–30.

[20] SOUBA W W.Intestinal glutamine metabolism and nutrition[J].The Journal of Nutritional Biochemistry,1993,4(1):2–9.

[21] REEDS P J,BURRIN D G,JAHOOR F,et al.Enteral glutamate is almost completely

metabolized in first pass by the gastrointestinal tract of infant pigs[J].The American Journal of Physiology,1996,270(3 Pt 1):E413-E418.

[22] BUDDLE J R,BOLTON J R.The pathophysiology of diarrhea in pigs[J].Pig News and Information,1992,13(1):41–45.

[23] 晏家友.缓释复合酸化剂对断奶仔猪消化道酸度及肠道形态和功能的影响[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2009.

[24] ANDERSON T A.Histological and cytological structure of the gastrointestinal tract of the luderick,*Girella tricuspidata* (pisces,kyphosidae),in relation to diet[J].Journal of Morphology,1986,190(1):109–119.

[25] 张玉仙,王文利,陈耀星,等.不同浓度的大蒜溶液对小鼠小肠黏膜结构的影响[J].中国兽医杂志,2008,44(5):12–13.

[26] GREENWOOD R H,MORRILL J L,TITGEMEYER E C,et al.A new method of measuring diet abrasion and its effect on the development of the forestomach[J].Journal of Dairy Science,1997,80(10):2534–2541.

[27] NOCEK J E,WILLIAM HEALD C,POLAN C E.Influence of ration physical form and nitrogen availability on ruminal morphology of growing bull calves[J].Journal of Dairy Science,1984,67(2):334–343.

[28] LESMEISTER K E,TOZER P R,HEINRICHS A J.Development and analysis of a rumen tissue sampling procedure[J].Journal of Dairy Science,2004,87(5):1336–1344.

[29] VELÁZQUES O C,LEDERER H M,RONBEAU J L.Butyrate and the colonocyte:implications for neoplasia[J].Digestive Diseases and Sciences,1996,41(4):727–739.

[30] MCGAVIN M D,MORRILL J L.Scanning electron microscopy of ruminal papillae in calves fed various amounts and forms of roughage[J].American Journal of Veterinary Research,1976,37(5):497–508.

Effects of Disodium Fumarate on Growth Performance, Ruminal Fermentation Function and Gastrointestinal Tract Development of Early Weaning Lambs

LIU Yunfang LAI Hanqing WANG Ting WANG Xinfeng* PAN Xiaoliang*

(College of Animal Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: The present study was conducted to explore the effects of disodium fumarate (DF) on growth performance, ruminal fermentation function and gastrointestinal tract development of early weaning lambs. Thirty male lambs with (50±5) days of age and (25±2) kg of body weight were selected and randomly allocated into three groups with ten sheep in each group. Lambs in control group were fed a basal diet, the experimental groups were added 0.5% and 1.0% DF on the basis of diet, respectively. The trial lasted for 70 days. The results show as follows: 1) the addition of DF increased average daily gain, and 1.0% group was significantly higher than control group ($P<0.05$). 2) DF had no significant effect of rumen fluid pH ($P>0.05$), but significantly decreased ammonia nitrogen concentration ($P<0.05$); DF significantly decreased lactic acid concentration in rumen fluid ($P<0.01$); compared with control group, the concentrations of total volatile fatty acid, acetate acid and propionate in 1.0% group were significantly increased ($P<0.05$). 3) The villi height of intestinal tract in experimental groups was higher than that in control group, and that of duodenum, jejunum and ileum in 0.5% group was significantly increased by 30.3%, 30.6%, 46.1% ($P<0.05$), respectively; the ratio of villi height to crypt depth of duodenum in experimental groups was significantly higher than that in control group ($P<0.05$), and that in 0.5% group was increased by 58.6%; compared with control group, the height of papilla on ruminal wall in 0.5% and 1.0% groups was increased by 139.84 and 156.74 μm ($P<0.05$); there was no significant difference in the density of papilla between experimental groups and control group ($P>0.05$). In general, it is revealed that DF addition can improve growth performance of weaning lambs, and stimulate the gastrointestinal tract development of early weaning lambs.

Key words: disodium fumarate; weaning lambs; growth performance; gastrointestinal tract

*Corresponding authors: WANG Xinfeng, associate professor, E-mail: wxf-4@163.com; PAN Xiaoliang, professor, E-mail: panxiaoliang600106@163.com

(责任编辑 王智航)